



成都信息工程大学

Chengdu University of Information Technology

实验课程指导书

基础实验篇-电子技术基础实验

成都信息工程大学 工程实践中心

目 录

实验一 线性网络定理验证	1
1.1 预习要求	1
1.2 实验目的	1
1.3 实验原理	1
1.4 实验内容	3
1.5 注意事项	4
1.6 思考题	4
1.7 报告要求	4
1.8 实验设备	4
实验二 RC 网络频率特性研究	5
2.1 预习要求	5
2.2 实验目的	5
2.3 实验原理	5
2.4 实验内容	9
2.5 注意事项	10
2.6 思考题	10
实验三 集成运放在信息运算方面的应用	12
3.1 实验目的	12
3.2 实验原理与设计方法	12
3.3 实验内容与设计电路技术指标	15
3.4 实验设备	16
3.5 预习与实验报告	16
3.6 思考题	16
实验四 MULTISIM 的应用	17
4.1 实验目的	17
4.2 实验平台（仪器设备）	17
4.3 实验原理	17
4.4 实验内容	18
4.5 思考题	20

实验一 线性网络定理验证

1.1 预习要求

- 1、了解直流稳压电源、数字万用表的基本使用方法。
- 2、掌握基尔霍夫定律、叠加定理、戴维南定理。
- 3、了解实验过程，熟悉电路结构。
- 4、完成下列预习作业：

(1) 按要求计算图 1.1 中各电压值。

U_{S1} 单独作用时 $U_{R1} = \underline{\hspace{1cm}}$ V, $U_{R2} = \underline{\hspace{1cm}}$ V;

U_{S2} 单独作用时 $U_{R1} = \underline{\hspace{1cm}}$ V, $U_{R2} = \underline{\hspace{1cm}}$ V;

U_{S1} 、 U_{S2} 共同作用时 $U_{R1} = \underline{\hspace{1cm}}$ V, $U_{R2} = \underline{\hspace{1cm}}$ V, $U_{ab} = \underline{\hspace{1cm}}$ V。

(2) 叠加定理中，当只有一个电压源单独作用时，另一个电压源应如何处理？

(3) 在图 1.1 所示的电压参考方向测量电压时，若电压表读数为负值，说明什么？

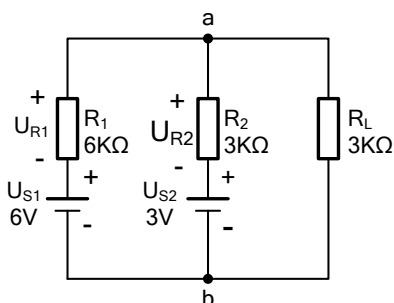


图 1.1 叠加定理、戴维南定理实验电路

(4) 理论计算图 1.1 戴维南等效电路的参数 $R_o = \underline{\hspace{1cm}} \Omega$, $U_{oc} = \underline{\hspace{1cm}}$ V。

1.2 实验目的

- 1、学习使用万用表、直流电源等基本仪器；
- 2、学习基本电子元件的识别与测试方法；
- 3、验证基尔霍夫定律，加深对电路基本定律适用范围普遍性的认识；
- 4、验证叠加定理，加深对电路参考方向和定理的理解；
- 5、掌握线性有源一端口网络等效电路参数的实验测定方法，加深对戴维南定理的理解。

1.3 实验原理

1. 基尔霍夫电流定律和电压定律

基尔霍夫电流定律：在集总参数电路中，任何时刻，对任一节点，所有支路电流的代数和恒等于零。即：

$$\sum I = 0 \quad (1.1)$$

要验证电流定律，可选电路如图 1.2 中的节点 a，按图示参考方向(取电压、电流关联参考方向)，将测得的各支路电流值代入式(1.1)加以验证。

基尔霍夫电压定律：在集总参数电路中，任一时刻，沿任一回路所有支路电压的代数和恒等于零。即：

$$\sum U = 0 \quad (1.2)$$

在列写式(1.2)时，首先需要任意指定回路绕行方向。通常支路电压的参考方向与回路绕

行方向相同者取正号，反之取负号。

要验证电压定律，可选电路中的任一回路，如图 1.2 中的任一回路，按指定的绕行方向，将测得的电压代入式(1.2)加以验证。

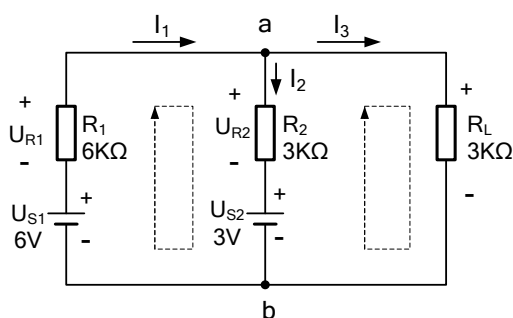


图 1.2 基尔霍夫定理验证电路

2. 叠加定理

在具有多个独立电源共同作用的线性网络中，任一支路的电流或电压等于各个独立源单独作用时在该支路上产生的电流或电压分量的代数和。在将电源移去时，电压源所在处以短路线代替，而电流源所在处则变为开路。

在线性网络中，功率是电压或电流的二次函数，故叠加定理不适用于功率计算。

叠加定理可以用图 1.1 所示的实验电路来验证，在 U_{S1} 与 U_{S2} 共同作用下的各电压值应该是电路仅有 U_{S1} 作用时以及仅有 U_{S2} 作用时的各对应电压值的代数和。实验中采用稳压电源，电源内阻可看作近似为零。

在分析一个复杂的线性网络时，可以根据叠加定理分别考虑各个电源的影响，从而使问题简化。

3. 戴维南定理

戴维南定理指出：任何一个线性有源一端口网络，对外部电路而言，可以用一个理想电压源与电阻的串联支路来代替，如图 1.3 所示。其理想电压源的电压为该端口网络的开路电压 U_{OC} ，电阻为该网络中所有独立源为零时的等效电阻 R_O 。

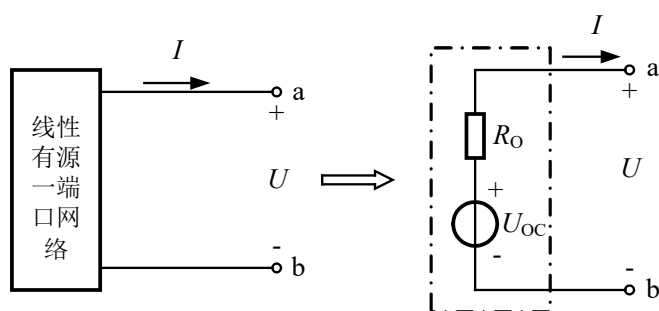


图 1.3 戴维南等效电路

线性有源一端口网络的开路电压 U_{OC} 可用高内阻的万用表直接进行测量，等效电阻 R_O 的测量方法则有多种。

(1)简单的方法是直接测出线性有源一端口网络开路电压 U_{OC} 及短路电流 I_{SC} ，即可算出

$$R_O = \frac{U_{OC}}{I_{SC}}$$

需注意, 由于电压表及电流表的内阻会影响测量结果, 为了减少测量的误差, 应尽可能选用高内阻的电压表和低内阻的电流表。若仪表内阻已知, 则可以在测量结果中引入相应的校正, 以避免由于仪表内阻的存在而引起误差。

(2) 被测网络输出电压较高, 内阻很小, 不宜短路, 可测出开路电压 U_{oc} 后在端口处接上负载电阻 R_L , 然后测出负载电阻的端电压 U 或流过的电流 I , 则有

$$R_o = \left(\frac{U_{oc}}{U} - 1 \right) R_L \text{ 或 } R_o = \frac{U_{oc}}{I} - R_L$$

如果 R_L 是电阻箱或可调电阻, 可调节其阻值使负载两端 U 的读数为 $U_{oc}/2$, 这时 R_L 的值就是要求的输入端电阻 R_o 。

(3) 网络中所有独立电源移去, 然后在端口处用伏安法或惠斯通电桥测定其入端电阻 R_o 。戴维南定理的等效电路是对其外部电路而言的。也就是说, 不管外部电路(负载)是线性的还是非线性的, 是定常的还是时变的元件, 只要被变换的端口网络是线性的(可以包含独立电源或受控源), 上述等效电路都是正确的。

1.4 实验内容

1. 万用表和直流稳压电源的使用和常用元器件的测试

- (1) 学习使用万用表和直流稳压电源。
- (2) 练习用万用表测量实验室提供的电阻 (保留两位小数)。
- (3) 练习用万用表测量实验室提供的电容 ($10\mu\text{F}$ 及以下) (保留两位小数)。
- (4) 用万用表判断实验电路板上的电位器的可调范围, 并判断其好坏。

2. 基尔霍夫电压定律的研究

按图 1.2 连接电路, 用万用表测定 $U_{s1}=6\text{V}$, $U_{s2}=3\text{V}$ 。按指定的回路绕行方向测量各电阻两端的电压及电流 I_1 、 I_2 、 I_3 , 利用测得数据验证基尔霍夫电压定律和电流定律的正确性 (填写表 1.1 中数据)。

3. 叠加定理的研究

按图 1.2 所示参考方向分别测量各元件的电压值。将测量数据记入表 1.1, 以验证叠加定理。

- (1) U_{s1} 单独作用;
- (2) U_{s2} 单独作用;
- (3) U_{s1} 、 U_{s2} 共同作用时的各支路电压 (同时填写表 1.2 “原网络” 一行内容)。

表 1.1 叠加定理实验数据记录

	$U_{R1} (\text{V})$	$U_{R2} (\text{V})$	$U_{RL} (\text{V})$
U_{s1} 、 U_{s2} 共同作用			
U_{s1} 单独作用			
U_{s2} 单独作用			
U_{s1} 、 U_{s2} 共同作用	$I_1=$	$I_2=$	$I_3=$

4. 线性有源一端口网络如图 1.2 所示, 用实验方法测定其戴维南等效电路的参数 U_{oc} 、 R_o 。

- (1) 用万用表测出线性有源一端口网络的开路电压 $U_{oc}=\underline{\hspace{2cm}}$ 。
- (2) 用概述中介绍的三种方法之一求出图 1.2 原网络的等效电阻 $R_o=\underline{\hspace{2cm}}\Omega$ 。

5. 测定原网络的外特性

改变图 1.2 中负载电阻 R_L 的值, R_L 分别取 ∞ 、 $3K\Omega$ 、 $2K\Omega$ 、 $1K\Omega$, 用万用表电压档分别测出 U_{ab} , 将测得数据填入表 1.2。

表 1.2 戴维南等效实验数据记录

	R_L / Ω	∞	$3K\Omega$	$2K\Omega$	$1K\Omega$
原网络	U/V				
戴维南等效电路	U/V				

6. 测定戴维南等效电路的外特性

用稳压源、电阻器串联按任务 3 中所测得的开路电压 U_{oc} 及输入端等效电阻 R_o 取值, 构成戴维南等效电路, 如图 1.3 所示, 在其输出端接上负载电阻 R_L , 阻值同任务 5, 分别测出相应的电压 U_{ab} , 填入表 1.2。

1.5 注意事项

- 1、测量电压时, 不但要读出数值, 还要判断实际方向, 并与设定的参考方向进行比较。若不一致, 则该数值前加“—”号。
- 2、实验中, 电压源的输出电压要用万用表的直流电压挡测量, 稳压电源指示的数值仅为参考值。

1.6 思考题

- 1、进行叠加定理实验时, 不作用的电压源应如何处理? 为什么?
- 2、如网络中含有受控源, 戴维南定理是否成立?

1.7 报告要求

- 1、整理实验数据, 将实验测得值与理论值进行比较, 若有差异, 请分析原因。
- 2、说明基尔霍夫定理、叠加定理、戴维南定理适用范围。
- 3、在同一坐标上, 作出线性有源一端口网络、戴维南等效电路等效电路外特性曲线, 分析得出结论。

1.8 所需实验设备

- 1、直流稳压电源
- 2、电阻器、电位器
- 3、数字万用表
- 4、实验箱与实验板

实验二 RC 网络频率特性研究

2.1 预习要求

- 1、了解示波器、函数信号发生器、交流毫伏表的基本使用方法。
- 2、了解网络函数、低通滤波、高通滤波的概念。
- 3、了解实验过程、分析电路原理、熟悉电路结构。

2.2 实验目的

- 1、掌握幅频特性和相频特性的测量方法；
- 2、加深对常用 RC 网络幅频特性的理解；
- 3、学会应用对数坐标来绘制频率特性曲线。

2.3 实验原理

1. 网络频率特性的定义

网络的响应相量与激励相量之比是频率 ω 的函数，称为正弦稳态下的网络函数。表示为

$$H(j\omega) = \frac{\text{响应向量}}{\text{激励向量}} = |H(j\omega)|e^{j\varphi(\omega)}$$

其模 $|H(j\omega)|$ 随频率 ω 变化的规律称为幅频特性，辐角 $\varphi(\omega)$ 随 ω 变化的规律称为相频特性。为使频率特性曲线具有通用性，常以 $\frac{\omega}{\omega_0}$ 作为横坐标。通常，根据 $|H(j\omega)|$ 随频率 ω 变化的趋势，将 RC 网络分为低通（LP）电路、高通（HP）电路、带通（BP）电路和带阻（BS）电路。

本次实验电路为 RC 低通网络和 RC 高通网络。

(1) RC 低通网络

图 2.1(a)所示为 RC 低通网络。它的网络函数为

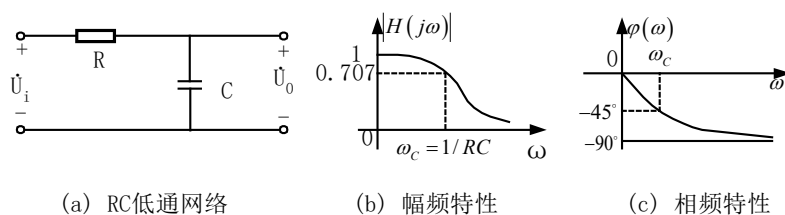


图 2.1 RC 低通网络及其频率特性

$$H(j\omega) = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{1/j\omega C}{R + 1/j\omega C} = \frac{1}{1 + j\omega RC}$$

其模为

$$|H(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}}$$

辐角

$$\varphi(\omega) = -\arctan(\omega RC)$$

显然，随着频率的增高， $|H(j\omega)|$ 将减小，这说明低频信号可以通过，高频信号被衰减或抑制，当 $\omega=1/RC$ 时

$$|H(j\omega)|_{\omega=\frac{1}{RC}} = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0.707$$

即 $U_O/U_I = 0.707$ ，通常把 U_O 降低到 $0.707 U_I$ 时的角频率 ω 称为截止角频率 ω_c 。即

$$\omega = \omega_c = 1/RC$$

图 2.1(b)、(c) 分别为 RC 低通网络的幅频特性和相频特性曲线。

(2) RC 高通网络

图 2.2 (a) 所示为 RC 高通网络。它的网络传递函数为

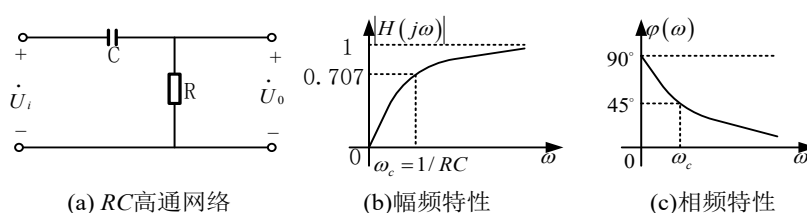


图 2.2 RC 高通网络及其频率特性

$$\begin{aligned} H(j\omega) &= \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} \\ &= \frac{R}{R + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{j\omega CR}{1 + j\omega CR} \\ &= \frac{\omega CR}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}} \angle 90^\circ - \tan^{-1} \omega RC \end{aligned}$$

其模为

$$|H(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{1}{\omega RC}\right)^2}}$$

辐角

$$\varphi = 90^\circ - \arctan(\omega RC)$$

可见， $|H(j\omega)|$ 随着频率的降低而减小，说明高频信号可以通过，低频信号被衰减或被抑制。网络的截止频率仍为 $\omega_c = 1/RC$ ，因为 $\omega = \omega_c$ 时， $|H(j\omega)| = 0.707$ 。它的幅频特性和相频特性分别如图 2.2(b)、(c) 所示。

(3) RC 带通网络(RC 选频网络)

图 2.3(a) 所示 RC 带通滤波电路的输入和输出分别为电压 \dot{U}_i 和 \dot{U}_o ，网络传递函数为

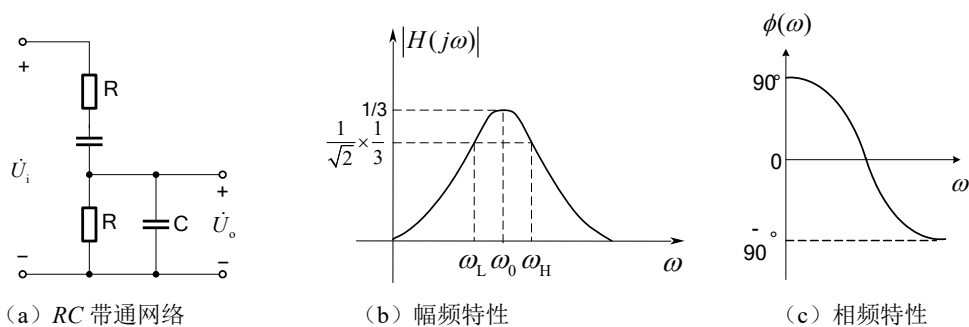


图 2.3 RC 带通网络及其频率特性

$$H(j\omega) = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{\frac{R}{1+j\omega RC}}{R + \frac{1}{j\omega C} + \frac{R}{1+j\omega RC}} = \frac{1}{3 + j\left(\omega RC - \frac{1}{\omega RC}\right)}$$

其模为

$$|H(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{9 + \left(\omega RC - \frac{1}{\omega RC}\right)^2}}$$

辐角

$$\varphi(\omega) = \arctan \frac{\frac{1}{\omega RC} - \omega RC}{3}$$

可以看出, 当信号频率为 $\omega_0 = \frac{1}{RC}$, 即 $f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$ 时, 模 $|H(j\omega)| = \frac{1}{3}$ 为最大 $\varphi(\omega) = 0$, 即输出与输入间相移为零。信号频率偏离 $\omega = 1/RC$ 越远, 信号被衰减和阻塞越厉害。说明 RC 网络允许以 $\omega = \omega_0 = 1/RC (\neq 0)$ 为中心的一定频率范围(频带)内的信号通过, 而衰减或抑制其他频率的信号, 即对某一窄带频率的信号具有选频通过的作用, 因此, 将它称为带通网络或选频网络。而将 ω_0 或 f_0 称为中心频率。当 $|H(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{2}} |H(j\omega)|_{\max}$ 时, 所对应的两个频率也称截止频率, 用 ω_H 和 ω_L 表示。它的幅频特性和相频特性分别如图 2.3(b)、(c)所示。

2. 网络频率特性测量方法

(1) 逐点法

按图接好电路后, 首先根据电路频率特性曲线的特点找出特征频率点 f_0 进行测量, 然后在 f_0 两侧依次选取若干个点再进行测量。测量中, 用交流毫伏表测量电压响应相量的有效值, 用双踪示波器测量响应与激励波形的相位差 φ , 并监测激励相量电压。峰峰值(U_{pp})不变。

(2) 扫频法

利用频率特性测试仪可以直接显示电路幅频特性曲线, 但其相位差仍需用示波器测出。

3. 对数频率坐标的概念

在绘制频率特性曲线时, 往往由于涉及的频率范围较宽, 若采用均匀分度的频率坐标,

势必使低频部分被压缩，而高频部分又相对展得较宽，从而使所绘制的频率特性曲线在低频段不能充分清晰地展示其特点。若采用对数分度的频率轴，就不会出现这种情况，如图 2.3 所示。应当注意，对数坐标是将轴按对数规律进行刻度，并非对频率取对数。

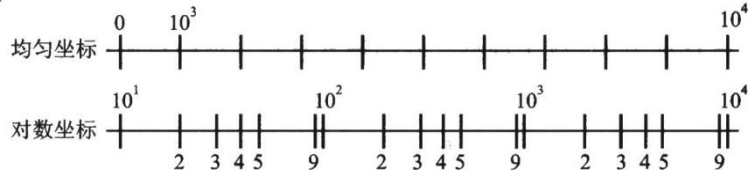


图 2.3 均匀分度坐标与对数分度坐标

同一电路的频率特性曲线，随坐标选取方式不同，曲线形状也会有所不同，可以根据实际需要适当选择，以突出需要表达的部分。

4. 电平的概念

在研究滤波器、衰耗器、放大器等电路时，通常并不直接考察电路中某点的电压，而是要了解各个环节的增益或衰耗，即传输电压比。因电压比本身是无量纲的，且往往数量级太大不便于作图或计算，特别是在通信系统的测试中，因为人耳听觉与声音的强度不是线性关系而是对数关系，所以在工程上引入了电平的概念，其定义如下：

当输入电压 U_1 (或电流 I_1) 与输出电压 U_2 (或电流 I_2) 相差 $e(2.718)$ 倍时，称 U_2 相对于 U_1 的电平为 1Np(奈培)，即

$$\alpha = \ln \frac{U_2}{U_1} = \ln \frac{I_2}{I_1} (Np)$$

电平的单位为奈培。当 $U_1(I_1)$ 取任意值时， α 称为 U_2 相对于 U_1 的相对电平。

如果不取自然对数，而采用以 10 为底的常用对数，则电平单位称为分贝(dB)，此时有

$$20 \lg \frac{U_2}{U_1} = 10 \lg \frac{P_2}{P_1} (dB)$$

分贝与奈培之间的关系为：1dB=0.1151Np 或 1Np=8.686 dB。

电平是一个相对量，要进行电平的测量就必须确定一个基准功率或基准电压。基准功率规定为在 600Ω 电阻上消耗 1mW 的功率，并用 P_0 表示，所以功率电平为

$$10 \lg \frac{P_2}{P_1} = 10 \lg P_x (dB)$$

该式表示的电平称为 P_2 的绝对功率电平。若电路中某点的功率为 1mW，此点的功率电平即为 0 dB。

由 $P_0 = U_0^2 / R$, $R=600\Omega$ ，可知 $U_0=0.775$ V，即基准电压为 0.775 V，所以电压电平为

$$20 \lg \frac{U_2}{U_0} = 20 \lg \frac{U_2}{0.775} (dB)$$

该式表示的电平称为 U_2 的绝对电压电平。显然，若电路中某点的电压为 0.775 V，则此点的绝对电压电平为 0 dB。

当电压大于 0.775 V 时，电压电平为正值，小于 0.775 V 的电压电平为负值。例如，某点电压为 3 V，其绝对电压电平为 11.76 dB；电压为 0.5 V，则绝对电压电平为 -3.8 dB。

网络分析仪、毫伏表等许多测量仪表都可以直接进行电平测量。电平测量实质上也就是电压测量，只是刻度不同而已。例如，YB2173 型毫伏表上的 dB 刻度线就是对 1 V 挡的电压指示取绝对电平后进行刻度的。

当毫伏表的量程置于 1 V 挡时，直接由表头的读数得到分贝值。当量程为其他挡时，应将读数加上修正值。修正值为各量程开关上的分贝值，如表 1.3.1 所示。

例如，量程为 +10 dB(×3V)挡时，表头读数为 -4 dB，则实际电平值为 -4 dB + 10 dB = +6 dB。量程为 -20 dB(×100 mV)挡时，表头读数 +2 dB，则实际电平值为 +2 dB + (-20 dB) = -18 dB。

表 2.1 量程与修正值关系表

量 程	300μ	1mV	3mV	10mV	30mV	100mV	300mV
修正值 / dB	-70	-60	-50	-40	-30	-20	-10
量 程	1V	3V	10V	30V	100V	300V	
修正值 / dB	0	10	20	30	40	50	

2.4 实验内容

1. 测量一阶 RC 低通电路的频率特性

电路如实验图 2.1(a)所示，图中 $R = 5.1 \text{ K}\Omega$ ， $C = 0.01 \mu\text{F}$ 。电路的输入端输入一个电平为 0 dBm (即 0.775 V) 的正弦信号，频率范围可选为 50 Hz ~ 20 kHz。测量低通电路的频率特性，其幅频特性用 dB 表示，相频特性用“度”表示，所有原始测量数据均记录在表 2.2 中。

实验时按图连接好电路后，首先改变信号源的频率(从低到高)，用毫伏表或示波器观测输出端电压的变化，粗略地看一下电路是否具有低通特性；找出 -3 dB 截止频率点。然后再逐点法测量。

表 2.2 低通滤波器参数记录表

	50Hz	$\frac{1}{10}f_c$	$\frac{1}{2}f_c$	f_c	$2f_c$	$10f_c$
$f(\text{Hz})$						
$u_o(\text{V})$						
$u_o[\text{dB}]$						
$\Phi(^{\circ})$						

2. 测量一阶 RC 高通电路的频率特性

电路如实验图 2.2(a)所示。图中 $R = 5.1 \text{ K}\Omega$ ， $C = 0.01 \mu\text{F}$ 。频率范围可选为 50 Hz ~ 20 kHz。

输入电压为 1V 的正弦信号。其幅频特性用“倍”数表示，相频特性用“度”表示，所有原始测量数据均记录在表 2.3 中。

测试时连接好实验电路，首先改变信号源的频率，用毫伏表或示波器观测输出端电压的变化，粗略地看一下电路是否具有高通特性，然后再逐点测量。

表 2.3 高通滤波器参数记录表

	$\frac{1}{10}f_c$	$\frac{1}{2}f_c$	f_c	$2f_c$	$10f_c$	40K
$f(\text{Hz})$						
$u_o(\text{V})$						
$u_o(\text{dB})$						
$\Phi(^{\circ})$						

3. 测定 RC 带通滤波电路的幅频特性及相频特性

按图 1.3.3 连接电路，取 $R=1\text{K}\Omega$ ， $C=0.1\mu\text{F}$ 。输入端接函数信号发生器，保持输入正弦电压 $\dot{U}_i=3\text{V}$ 不变，改变频率(100Hz~20 kHz)，用毫伏表测量输出电压 u_o ；同时用示波器观察并记录 \dot{U}_o 和 \dot{U}_i 的相位差。并测定其中心频率 f_0 及两个截止频率 f_H 、 f_L 。填入表格 2.4 中。

表 2.4 带通滤波器参数记录表

	$\frac{1}{10}f_L$	$\frac{1}{2}f_L$	f_L	f_0	f_H	$2f_H$	$10f_H$
$f(\text{Hz})$							
$u_o(\text{V})$							
$u_o[\text{dB}]$							
$\Phi(^{\circ})$							

2.5 注意事项

1、在测试过程中低通电路在改变频率后要始终保持输入电平为 0dBm（即 0.775V）；高通电路在改变频率后要保持输入电压为 1V。

2、测试过程中，当改变函数信号发生器的频率时，其输出电压有时将发生变化，因此，测试时，需用毫伏表监测函数信号发生器的输出电压，使其保持不变。

2.6 思考题

- 1、在 RC 带通滤波电路的实验过程中，当 \dot{U}_o 与 \dot{U}_i 同相时，其电压比值是否等于 1/3，如果不是，请分析原因。
- 2、若保持电路参数不变，仅改变输入信号 \dot{U}_s 的幅度，响应会有什么变化？
- 3、根据实验曲线的结果，说明电容器充放电时电流、电压变化规律及电路参数的影响

及所产生误差的原因。

实验三 集成运放在信息运算方面的应用

3.1 实验目的

- 1、加深对集成运放基本特性的理解。
- 2、学习集成运放在基本运算电路中的设计、应用及测试。

3.2 实验原理与设计方法

集成运放是高增益直流放大器，若在运算放大器的输入端与输出端之间加上适当的反馈网络，便可以实现不同的电路功能。例如，加入线性负反馈网络，可以实现信号的放大功能以及加、减、微分、积分等模拟运算功能；加入非线性负反馈网络，可以实现乘法、除法、对数等模拟运算功能。如果加入线性或者非线性正反馈网络（或将正、负两种反馈形式同时加入），就可以构成一个振荡器产生各种不同的模拟信号（如正弦波、三角波等）。由运算放大器和深度负反馈网络组成的模拟运算电路如图 3.1 所示。 Z_n 、 Z_f 、 Z_p 分别为负反馈网络的阻抗，即反相输入端阻抗及同相端输入阻抗。 R_b 为平衡电阻。运算放大器在加上负反馈网络以后的闭环增益 A_{uf} 要比其开环增益 A_{ud} 小得多， A_{uf} 可根据需要来设计。

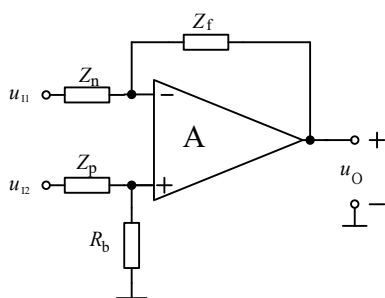


图 3.1 集成运放构成的放大电路

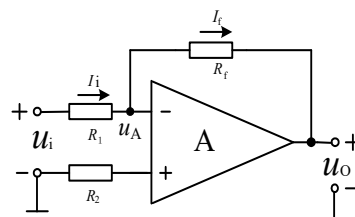


图 3.2 反相比例放大器

下面介绍运算放大器的几种基本应用电路。

1. 反相比例放大器特性的研究

如图 3.2 所示，电路的输入信号与反馈信号在反相输入端并联，同相输入端接地，所以，反相比例运算放大器是具有深度并联负反馈放大电路。

由于集成运算放大器的开环增益高， A 点近似为地电位，一般称为虚地，因此， A 点对地的电压 $u_A \approx 0$ 。则

$$\begin{aligned} i_F &= \frac{u_i - u_A}{R_1} \approx \frac{u_i}{R_1} \\ i_F &= \frac{u_A - u_O}{R_f} \approx \frac{-u_O}{R_f} \\ i_i &= i_F \end{aligned}$$

$$A_{uf} = \frac{u_O}{u_1} = -\frac{R_f}{R_1} \quad (3.1)$$

$$u_O = -\frac{R_f}{R_1} u_1$$

当改变 R_f/R_1 的比值, 则可得到输出反相与输入电压有一定比例关系的电压值。当 $R_f=R_1$ 时, $u_O = -u_1$, 电路成为一个反相跟随器。

2. 减法器(差分运算)特性的研究

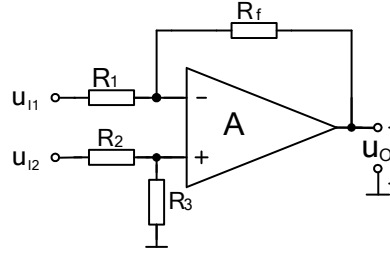


图 3.3 减法器

图 3.3 所示, 输入信号 u_{11} 和 u_{12} 分别加到放大器的反相输入端和同相输入端。而同相输入端的电阻 R_2 和 R_3 组成分压器, 将同相输入端的信号损耗一部分, 以使得放大器对 u_{11} 和 u_{12} 的放大倍数的绝对值相等, 以便有效地抑制输入信号的共模分量。由图可列出下列方程:

$$\begin{aligned} \frac{u_{11} - u_-}{R_1} &= \frac{u_O - u_-}{R_f} \\ \frac{u_{12} - u_+}{R_2} &= \frac{u_+}{R_3} \\ u_- &= u_+ \end{aligned}$$

解方程组可得

$$u_O = \left(\frac{R_3}{R_2} u_{12} - \frac{R_f}{R_1} u_{11} \right) = -\left(\frac{R_f}{R_1} u_{11} - \frac{R_3}{R_2} u_{12} \right)$$

当 $R_1=R_2=R$, $R_f=R_3$ 时

$$u_O = \frac{R_f}{R} (u_{12} - u_{11}) = -\frac{R_f}{R} (u_{11} - u_{12}) \quad (3.2)$$

为实现精确的差分比例运算, 外接电阻元件必须严格匹配, 即 $R_1=R_2=R$, $R_f=R_3$ 。

差模放大倍数

$$A_{ud} = \frac{u_O}{u_{12} - u_{11}} = \frac{R_f}{R}$$

3. 反相加法器特性研究

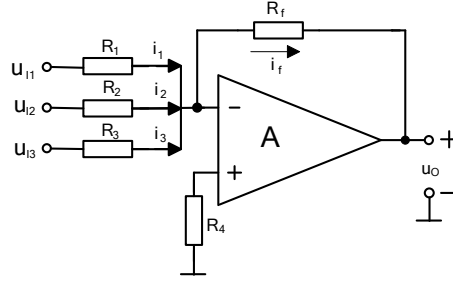


图 3.4 反相加法器

由图 3.4 所示，将 n 个模拟信号 u_1, \dots, u_n 分别通过电阻 R_1, \dots, R_n 加到运放的反相输入端，以便对 n 个输入信号电压实现代数加运算。

在反相加法器中，首先将各输入电压转换为电流，由反相端流向反馈回路电阻 R_f ，经 R_f 转换为输出电压。由图可得

$$i_1 = \frac{u_{11}}{R_1}$$

$$i_2 = \frac{u_{12}}{R_2}$$

$$i_n = \frac{u_{1n}}{R_n}$$

$$i_f = -\frac{u_O}{R_f}$$

$$i_f = i_1 + i_2 + \dots + i_n$$

解方程组可得

$$u_O = -R_f \left(\frac{u_{11}}{R_1} + \frac{u_{12}}{R_2} + \dots + \frac{u_{1n}}{R_n} \right)$$

当 $R_1=R_2=\dots=R_n=R$ 时，则

$$u_O = -\frac{R_f}{R} (u_{11} + u_{12} + \dots + u_{1n}) \quad (3.3)$$

在运算放大器具有理想特性时，各相加项的比例因子仅与外部电路的电阻有关，而与放大器本身的参数无关，选择适当的电阻值，就能得到所需的比例因子，这种加法器可以达到很高的精度和稳定性。补偿电阻 R_4 用来保证电路的平衡对称，其值应选为

$$R_4 = R_f // R_1 // R_2 // \dots // R_n$$

4. 反相积分器特性研究

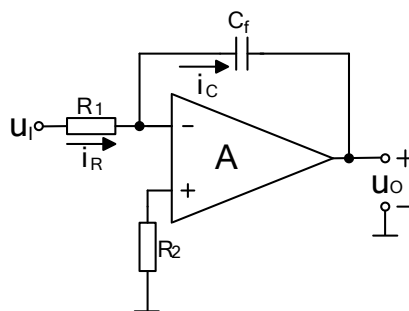


图 3.5 反相积分电路

当输入电压为 u_i 时，在电阻 R_1 产生输入电流将向电容 C_f 充电；充电过程是输入电流在电容上随时间的电荷积累，而电容一端接在虚地点，另一端是积分器的输出，因此，输出电压 u_o 将反映输入信号对时间的积分过程。由图可得

$$\begin{aligned} i_R &= i_C \\ \frac{u_i}{R_1} &= -C_f \frac{du_o}{dt} \\ u_o &= -\frac{1}{R_1 C_f} \int_0^t u_i(t) dt \end{aligned} \quad (3.4)$$

式中 $R_1=R_2=R$ ，由此表明，输出电压正比于输入电压对时间的积分，其比例常数取决于反馈电路的时间常数， $\tau=RC_f$ ，而与放大器参数无关。

若输入电压 u_i 为直流电压 U_i ，则

$$u_o = -\frac{1}{RC_f} U_i \cdot t$$

3.3 实验内容与设计电路技术指标

1. 减法运算电路

给定条件：电源电压为 $\pm 12V$ ， $\frac{R_f}{R}$ 的比值为 10。

(1) $u_{i1}=0.3V$ ， $u_{i2}=0.5V$ ， $u_o=$ _____

(2) $u_{i1}=0.2V$ ， $u_{i2}=-0.3V$ ， $u_o=$ _____

2. 反相加法运算电路

给定条件：电源电压为 $\pm 12V$ ， $\frac{R_f}{R}$ 的比值为 10。

$u_{i1}=0.2V$ ， $u_{i2}=-0.5V$ ， $u_o=$ _____

3. 反相积分运算电路

给定条件： $R=10K$ ， $C_f=0.01\mu f$ ，给积分电路输入 $2V_{pp}$ 、频率分别为 $100Hz$ 、 $1KHz$ 、 $10KHz$ 的方波，观察并在图 3.7 中记录输入、输出波形。

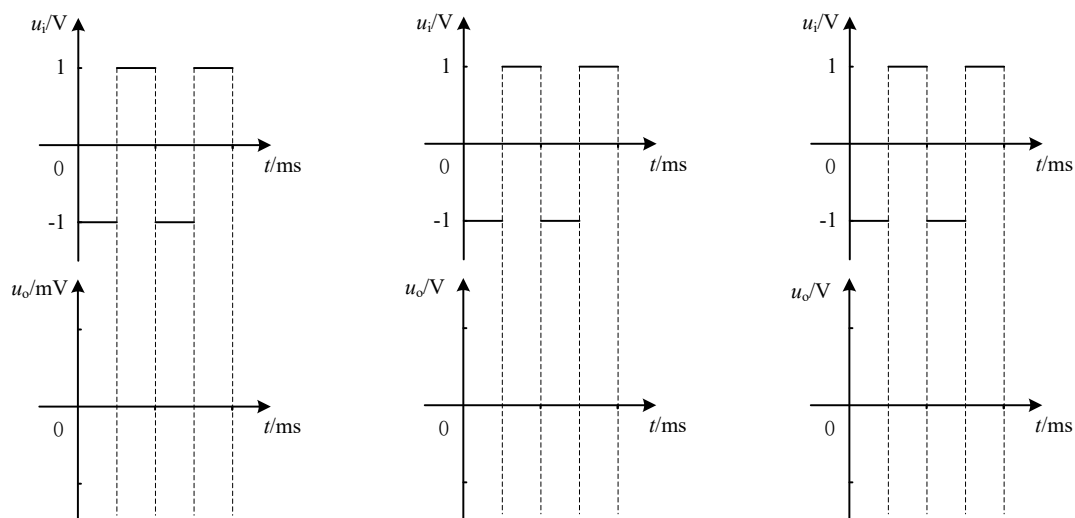


图 3.7 输入输出波形

3.4 实验设备

1、实验箱与实验板	1 套
2、函数信号发生器	1 台
3、数字双踪示波器	1 台
4、数字交流毫伏表	1 台
5、数字万用表	1 台

3.5 预习与实验报告

- 1、复习运算放大器应用理论；
- 2、根据给定条件，设计上述运算应用电路，并绘出电路图；
- 3、自拟实验步骤及测试记录表格；
- 4、将实验测试值与理论值进行比较，分别分析误差原因。

3.6 思考题

1、在同相比例放大电路中，设输入信号的幅度保持不变，运算放大器低频时输出电压分别为 0.4V 和 4V，在这两种情况下电路的上限截止频率是否相同？为什么？

2、若要设计一个 $A=20$ 的反相放大电路，用于放大频率为 150kHz 的正弦信号，运算放大器选用 LM324 可以吗？选用 LM358 可以吗？为什么？若放大频率为 1500kHz 的正弦信号呢？

实验四 Multisim 的介绍及应用

4.1 实验目的

- 1、Multisim 电路仿真软件的使用（仿真电路搭建、虚拟测试仪器使用、电量测试方法）。
- 2、掌握线性有源一端口网络等效电路参数的实验测定方法（戴维南定理的验证）。
- 3、了解运放线性区、非线性区的工作原理及应用。
- 4、理解简单电子系统结构组成。
- 5、理解简易声控照明灯电路工作原理。

4.2 实验平台（仪器设备）

- 1、Multisim 10.0 及以上版本
- 2、虚拟元件及仪器

4.3 实验原理

1、戴维南定理：任何一个线性有源一端口网络 N，对外部电路而言，可以用一个理想电压源与电阻的串联支路来代替，如图 4.1 所示。其理想电压源的电压为该一端口网络的开路电压 U_{oc} ，电阻为该网络中所有独立源为零时的入端等效电阻 R_i 。

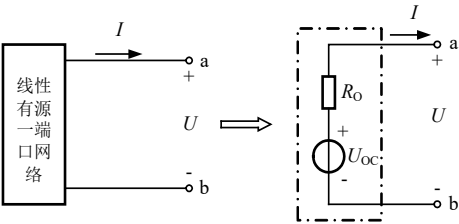


图 4.1 戴维南定理

2、电压比较器是集成运放非线性应用电路，它将一个模拟量电压信号和一个参考电压相比较，在二者幅度相等的附近，输出电压将产生跃变，相应输出高电平或低电平。

图 4.2 所示为一最简单的电压比较器， U_R 为参考电压，加在运放的反相输入端，输入电压 u_i 加在同相输入端。

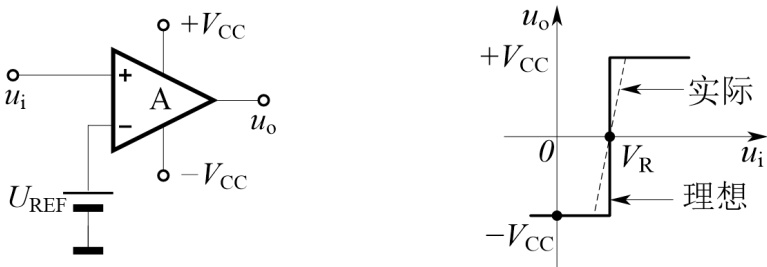


图 4.2 单门限电压比较器

当 $u_i < V_R$ 时，运放输出低电平，即 $u_o = -V_{CC}$ ；当 $u_i > V_R$ 时，运放输出高电平，即 $u_o = V_{CC}$ 。因此，以 V_R 为界，当输入电压 u_i 变化时，输出端反应出两种状态——高电位和低电位。

过零比较器是单门限比较器的一个特例。图 4.3 电路为有限幅电路的过零比较器， D_Z 为限幅稳压管。信号从运放的反相输入端输入，参考电压为零，从同相端输入。当 $U_i > 0$ 时，

输出 $U_o = -(U_z + U_D)$ ，当 $U_i < 0$ 时， $U_o = +(U_z + U_D)$ 。其电压传输特性如图 4.3 (b) 所示，过零比较器结构简单，灵敏度高，但抗干扰能力差。

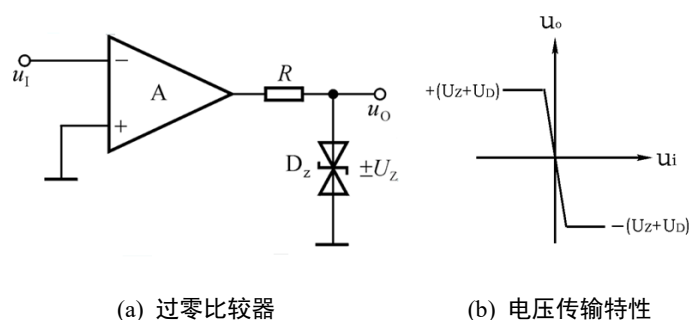


图 4.3 过零比较器

4.4 实验内容

1. 用 Multisim 验证戴维南等效定理

(1) 开路电压 $U_{oc} = \underline{\hspace{2cm}}$ V。

(2) 等效电阻 $R_o = \underline{\hspace{2cm}}$ K Ω 。

	R_L/Ω	∞	3K	$R_L=R_o$	1K	100
原网络	U/V					
戴维南电路	U/V					

2. 过零比较器测试

实验电路如图 4.4 所示。

(1) 自行连接电路并接通 +12V 电源。

(2) 测量 u_i 悬空时的 u_o 值。

(3) u_i 输入 500Hz、幅值为 1V 的正弦信号，对应观察并记录 $u_i \rightarrow u_o$ 波形。

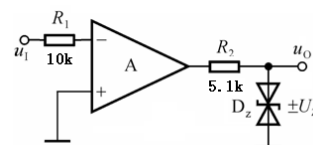


图 4.4 过零比较器测试

3. 比较器的工程应用——声音控制照明灯的设计

设计并仿真一个 5V 供电直流声光控制电路，用声音作为触发条件，即用声音（拍手等）触发控制发光二极管（LED）发光，灯亮延迟 5 秒后状态自动熄灭。设计框图如图 4.5 所示。

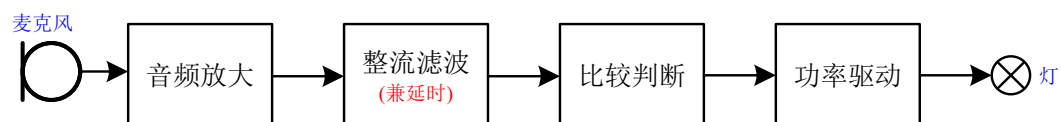


图 4.5 设计框图

驻极体话筒：手机话筒等电子设备中常用的一种话筒，是一种有源话筒（需供电，区别于动圈式话筒）有正负极之分（连接外壳的焊盘为负极）。

电路设计如图 4.6 所示。

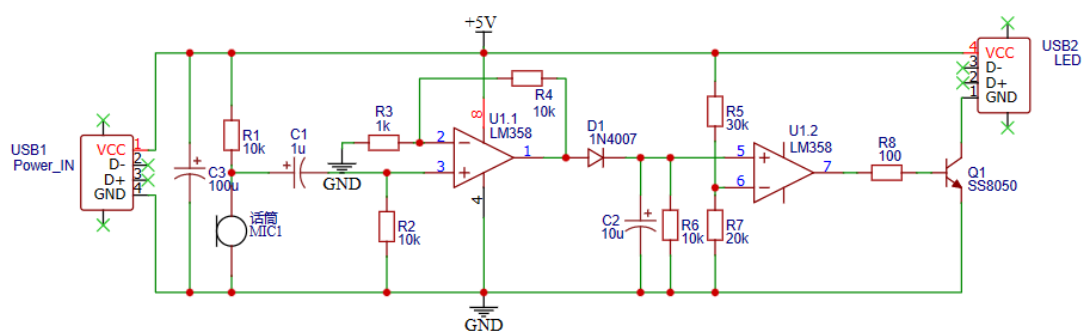


图 4.6 声音控制照明灯的计框图

工作原理：图中 MIC1 为驻极体话筒，可将声音转换为毫伏级的交流电压，随后经电容耦合至同相比例运算放大器，得到相对较大的交流信号，由于交流信号不利于直接作为控制信号，因此通过二极管 D1 和 C2 构成的整流滤波电路转换为直流，该直流电压的大小可体现外界声音的大小。根据设计要求，灯只有亮和灭两种状态，而转换得到的直流电压仍然为一连续变化的模拟信号，因此需要将该直流电压转换成数字高低电平，这里采用运放构成的单门限电压比较器实现，当转换得到的直流电压高于门限值时，比较器输出高电平，三极管饱和导通，相当于开关闭合，使照明灯点亮；而直流电压低于门限值时，比较器输出低电平，三极管截止，相当于开关断开，照明灯熄灭。

由于声音触发具有突发性、短暂性，因此声音信号触发后，C2 电容被充电，其电压将高于设置的门限电压，使比较器输出为高电平，LED 灯亮；但随着声音信号消失后，电容 C2 的电压不能突变，而是按照一定规律缓慢下降，当其两端的电压低于门限电压后，比较器输出低电平，LED 灯灭。通过调整电容 C2、R6 或门限值的高低，即可实现一定的延时控制功能。

(1) 在 Multisim 中按照电路原理图自行搭建仿真电路图。

(2) 静态测试：

运行仿真后，测试电路中各点（蓝圈）的直流电位值并记入表 4.1。

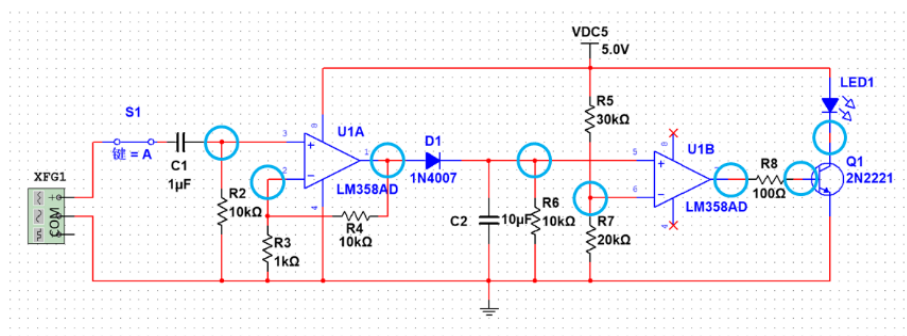


表 4.1 “声音控制照明灯”静态工作点测试数据

U _{1.1} 静态参数	U ₊ =	U ₋ =	U _O =
U _{1.2} 静态参数	U ₊ =	U ₋ =	U _O =
Q ₁ 静态参数	U _{BQ} =		U _{CQ} =

(3) 动态测试：断开 C1 正极与电路的连接，并在 C1 正极对地施加 $f=1\text{KHz}$ 、 20mV_{rms}

的正弦波模拟声音信号，运行仿真后测试电路中各点（绿圈）的交流电压波形或直流电压值（蓝圈）并记录。

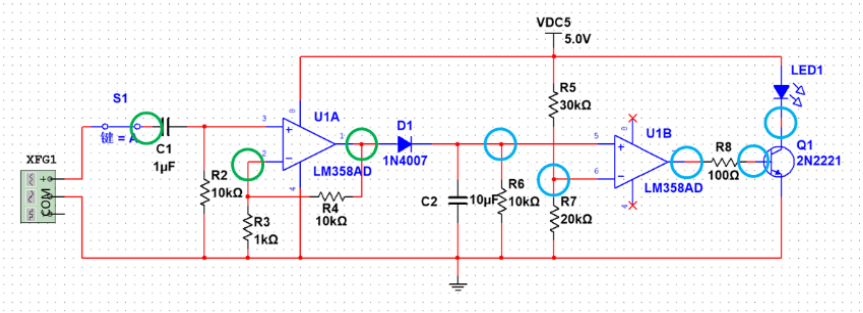


表 4.2 “声音控制照明灯” 动态测试数据

$U_{1.2}$	$U_{+}=$	$U_{-}=$	$U_{O}=$
Q_1	$U_B=$	$U_C=$	

（4）实际测试：通过调整 R7 的值，实现声音触发照明灯点亮，并经过约 5s 的延时后自行熄灭。

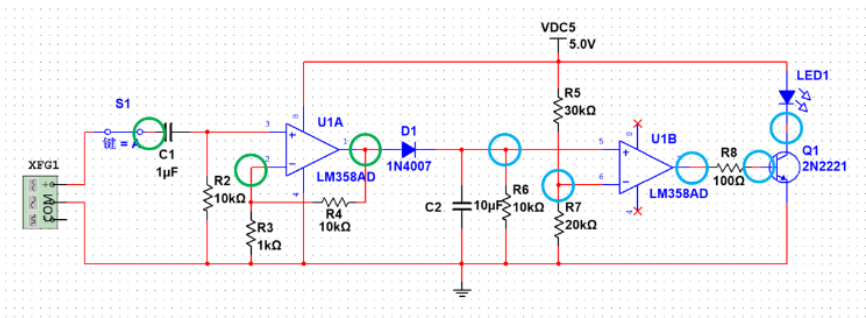


表 4.3 “声音控制照明灯” 声音触发实测数据

$U_{1.2}$	$R_6=10k, C_2=10\mu F$	$U_{-}=$	$R_7= \text{ } k\Omega$
-----------	------------------------	----------	-------------------------

4.5 思考题

- 1、除修改 R7 外，还可以采用哪些方式改变 LED 的延迟时间？
- 2、动态测试中，运放的输出波形为何出现了明显失真？该失真可以如何消除？
- 3、如果要改为有声音时灯熄灭，没有声音时 LED 发光，电路该如何修改？